

УДК 004.942

**А. Е. Болгов, К. А. Щипанов, Н. А. Спирин**

ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет

имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург, Россия

## **РАЗРАБОТКА WEB-ПРИЛОЖЕНИЯ СИСТЕМЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ И ИДЕНТИФИКАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ВНЕШНЕГО ТЕПЛООБМЕНА В НАГРЕВАТЕЛЬНОЙ ПЕЧИ НА ЯЗЫКЕ ПРОГРАММИРОВАНИЯ JAVASCRIPT**

### **Аннотация**

*Нагрев металла играет важную роль в получении качественной готовой продукции при выполнении пластической деформации или термообработки. Поэтому выбор правильной и обоснованной технологии нагрева металла является серьезной и важной задачей.*

*На сегодняшний день возрастает роль информационно-моделирующих систем, представляющих собой компьютерную реализацию научно-обоснованных математических моделей, вследствие нестабильности с поставками сырья и энергоресурсов. Информационно-моделирующие системы выполняют задачи по моделированию, планированию и принятию решений, что позволяет технологам правильно и вовремя воздействовать на процессы, протекающие в металлургических агрегатах.*

*Для создания информационной системы использовался язык программирования JavaScript, а также библиотека React. Основной целью разработки информационной системы является моделирование и идентификация параметров внешнего теплообмена в нагревательной печи. Достижение этой цели обеспечит оптимальный режим нагрева металла по всему сечению, что позволит увеличить выход годного металла, за счет уменьшения брака.*

**Ключевые слова:** *нагревательная печь, идентификация, моделирование, теплообмен, web-приложение, информационно-моделирующая система.*

### **Abstract**

*Heating metal plays an important role in obtaining high-quality finished products when performing plastic deformation or heat treatment. Therefore, the choice of the correct and reasonable technology of heating the metal is a serious and important task.*

*Today, the role of information-modeling systems, which represent a computer implementation of scientifically-based mathematical models, is increasing, due to the instability with the supply of raw materials and energy resources. Information-modeling systems perform tasks for modeling, planning and decision-making, which allows technologists to influence the processes occurring in metallurgical plants correctly and in time.*

*To create an information system, the programming language JavaScript was used, as well as the React library. The main purpose of developing an information system is to simulate and identify the parameters of external heat exchange in a heating furnace. Achieving this goal will ensure optimal heating of the metal throughout the cross section, which will increase the yield of metal, by reducing scrap.*

**Key words:** *heating furnace, identification, modeling, heat exchange, web-application, information modeling system, JavaScript, React.*

Математическое моделирование тепловых процессов, происходящих в промышленных печах, т.е. исследование этих процессов, основанное на их математическом описании, давно и в широких масштабах используется в металлургической теплотехнике [1].

Применение высококачественных математических моделей приносит значительный экономический эффект. Они позволяют производить исследование процессов, происходящих в металлургических агрегатах, при неизмеримо меньших затратах, чем натурные исследования на реальных агрегатах, на стендах или на физических моделях.

Целями разработки web-приложения являются:

- улучшение технико-экономических показателей производства;
- повышение выпуска качественного продукта.

Основные задачи, которые должно решать web-приложение:

– расчет температуры нагрева металла по сечению заготовки, в зависимости от расстояния, до точки измерения при различных видах граничных условий: при конвекции или излучении;

– идентификация параметров: при конвекции или излучении;

– моделирование с возможностью корректировки некоторых исходных данных для моделирования условий работы металлургического агрегата различной конфигурации;

– визуализация: отображение в табличном и графическом виде результатов расчета;

– отчеты: формирование результатов расчета в виде, пригодном для их распечатки и сохранения во внешнем файле наиболее популярных форматов.

Получение объективной информации о температурных полях нагреваемых заготовок является одной из основных проблем при построении систем управления нагревательными печами. Время от времени удается контролировать в лучшем случае только температуру поверхности металла, а температура внутренних точек по толщине недоступна для непосредственного измерения, она может быть определена только расчетным путем с помощью математической модели.

Известно, что теплообмен в рабочем объеме нагревательных печей происходит путем конвекции и излучения, тогда как перенос тепла в нагреваемом металле осуществляется за счет теплопроводности. При этом процесс внутреннего теплообмена в нагреваемом материале описывается математической моделью следующей структуры:

$$c\rho \frac{\partial t(x,l,\tau)}{\partial \tau} + c\rho v_m(\tau) \frac{\partial t(x,l,\tau)}{\partial l} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial t(x,l,\tau)}{\partial x} \right), \quad (1)$$

где  $c$ ,  $\rho$ ,  $\lambda$  – соответственно теплоемкость единицы массы, плотность и коэффициент теплопроводности, зависящие в общем случае от температуры;  $x$  – координата по толщине металла;  $l$  – координата по длине печи;  $\tau$  – время;  $S$  – расчетная толщина заготовки, т.е.  $x = S$  для наблюдаемой поверхности заготовки.

Идентификацией динамической системы (процесса) называется получение или уточнение по экспериментальным данным и математической модели этой системы или процесса, выраженной посредством того или иного

математического аппарата. В данном случае рассматривается параметрическая идентификация, т.к. нам известна структура, т.е. класс моделей и связи, описывающие свойства системы.

Структура идентифицируемой модели внешнего теплообмена может быть представлена в различной форме:

– конвективной

$$\lambda \cdot \frac{\partial t(x, l, \tau)}{\partial x} \Big|_{x=S} = \sum_{i=1}^n A_k(l, \tau) [T_i(l, \tau) - t(S, l, \tau)]; \quad (2)$$

– лучистой

$$\lambda \cdot \frac{\partial t(x, l, \tau)}{\partial x} \Big|_{x=S} = \sum_{i=1}^n A_l(l, \tau) \cdot C_0 \left[ \left( \frac{T(l, \tau) + 273}{100} \right)^4 - \left( \frac{t(S, l, \tau) + 273}{100} \right)^4 \right], \quad (3)$$

где  $A_k(l, \tau)$  – параметр идентификации конвективного теплообмена, имеющий размерность коэффициента теплоотдачи (эффективный коэффициент конвективного теплообмена);  $A_l(l, \tau)$  – параметр идентификации лучистого теплообмена, имеющий размерность степени черноты;  $C_0$  – коэффициент излучения абсолютного тела [2].

Задача идентификации параметров внешнего теплообмена сводится к определению таких значений параметров теплообмена для  $j$ -й зоны  $A_{kj}$ ,  $A_{lj}$ , при которых в идеале рассчитанная температура поверхности металла в  $i$ -й момент времени совпала бы с измеренным значением температуры поверхности металла.

Уравнение математической модели, описывающей нагрев бесконечной пластины с учетом зависимости теплофизических характеристик тела – коэффициента теплопроводности и удельной объемной теплоемкости – от температуры. Уравнение теплопроводности в данном случае имеет вид:

$$c'(T) \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial y} \left[ \lambda(T) \frac{\partial T}{\partial y} \right], 0 < y < \delta \quad (4)$$

Удельная объемная теплоемкость является функцией температуры, поэтому ее конкретное значение, соответствующее переходу от  $k$ -го к  $k+1$ -му моменту времени, будем определять при некоторой средней температуре элементарного слоя.

При записи разностного аналога закона Фурье, устанавливающего связь плотностей тепловых потоков с температурами в окрестности рассматриваемого  $i$ -го узла, следует учесть зависимость коэффициента теплопроводности от температуры.

$$q_{i+\frac{1}{2}} = -\lambda(T_{i+\frac{1}{2}}) \frac{T_{i+1} - T_i}{\Delta y}; q_{i-\frac{1}{2}} = -\lambda(T_{i-\frac{1}{2}}) \frac{T_i - T_{i-1}}{\Delta y}, \quad (5)$$

где через  $T_{i+1/2}$  и  $T_{i-1/2}$  обозначены температуры на границах  $i$ -того элементарного слоя:

$$T_{i+\frac{1}{2}} = (T_i + T_{i+1})/2; T_{i-\frac{1}{2}} = (T_{i-1} + T_i)/2. \quad (6)$$

Здесь конкретные значения коэффициента теплопроводности для каждого шага по времени определяются при некоторых средних температурах на границах элементарного слоя.

Для решения системы разностных уравнений был применен метод прогонки [3]. Формулы для расчета прогоночных коэффициентов и температуры в правом граничном узле:

$$\alpha_1 = \frac{2f_1^+}{1 + 2f_1^+}; \beta_1 = \frac{T_i^k}{1 + 2f_1^+}; \quad (7)$$

$$\alpha_i = \frac{f_1^+}{1 + f_1^+ + f_i^-(1 - \alpha_{i-1})}; \beta_i = \frac{T_i^k - f_i^-\beta_{i-1}}{1 + f_1^+ + f_i^-(1 - \alpha_{i-1})}; \quad (8)$$

$$T_{n+1}^{k+1} = \frac{T_{n+1}^k + 2f_{n+1}^-(bT_0 + \beta_n)}{1 + 2f_{n+1}^-(1 + b - a_n)}. \quad (9)$$

Для решения системы был выбран метод простой итерации. На первом шаге итераций значения теплофизических параметров, входящих в выражения для коэффициентов системы, определяются по известным значениям температур, т.е. в качестве первого приближения для искомых температур используется решение системы уравнений. На каждом последующем шаге теплофизические параметры вычисляются по приближенным значениям температур, найденным на предшествующем этапе. Итерации продолжаются до тех пор, пока разность между последовательными приближениями искомых температур не станет достаточно малой [4-5].

Далее следует произвести учет нелинейности граничного условия. Особенности решения задач теплопроводности с нелинейным граничным условием рассмотрим на примере нагрева сляба в сварочной зоне нагревательной печи [6]. При этом для упрощения задачи примем следующие допущения: нагрев является симметричным; теплофизические характеристики стали не зависят от температуры; распределение температуры по сечению сляба в начале сварочной зоны является равномерным; конвективной составляющей внешнего теплового потока можно пренебречь, а плотность потока результирующего излучения на поверхности металла приближенно выразить как

$$\varepsilon_{\text{пр}} \sigma_0 (T_0^4 - T_w^4), \quad (10)$$


где  $T_0$  – температура сварочной зоны;

$\varepsilon_{\text{пр}}$  – приведенная степень черноты;

$\sigma_0 = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$  – постоянная Стефана–Больцмана.

На основе численного метода решения составляют алгоритм решения задачи на ЭВМ, после чего составляют программу на одном из алгоритмических языков. Описанный выше алгоритм реализован в виде web-приложения на интерпретируемом языке JavaScript с применением библиотеки React, которая обеспечивает создание масштабируемых web-приложений.

На рис. 1 представлена главная страница приложения для ввода и корректировки исходных данных, а также выбора материала заготовки и параметров зон печи.


Идентификация
Главная
Справочник веществ
О программе
Кафедра ТИМ УрФУ

### Исходные данные

Число теплофизических зон: 
Толщина нагреваемого металла, м: 
Шаг расчета по толщине металла, м: 
Шаг расчета по длине, м: 
Скорость перемещения в печи, м/с: 
Начальная температура металла, С:

### Свойства материала

Материал: 
Теплопроводность, Вт/(м\*К): 
Температуропроводность, м2/с: 
Удельная объемная теплоемкость, Дж/(м3\*К):

### Параметры зон в печи


Параметр	Зона 1	Зона 2	Зона 3	Зона 4	Зона 5
Длина теплотехнической зоны, м	<input type="text" value="3"/>	<input type="text" value="3"/>	<input type="text" value="3"/>	<input type="text" value="3"/>	<input type="text" value="3"/>
Температура греющих газов, С	<input type="text" value="1427"/>	<input type="text" value="1427"/>	<input type="text" value="1427"/>	<input type="text" value="1427"/>	<input type="text" value="1427"/>
Действительное значение ALFA	<input type="text" value="346"/>	<input type="text" value="352.5"/>	<input type="text" value="368.4"/>	<input type="text" value="435.6"/>	<input type="text" value="400"/>
Действительное значение EPSnp	<input type="text" value="0.488"/>	<input type="text" value="0.5039"/>	<input type="text" value="0.5022"/>	<input type="text" value="0.557"/>	<input type="text" value="0.6"/>

Моделирование
Идентификация

Рис. 1. Главная страница web-приложения

В дальнейшем пользователь может выполнить моделирование или идентификацию при конвективном или лучистом теплообмене с графическим выводом результатов расчетов.

На рис. 2 представлена страница приложения с результатом выполнения моделирования нагрева заготовки.


Идентификация
Главная
Справочник веществ
О программе
Кафедра ТИМ УрФУ

Режим нагрева

☒ Конвекция
☐ Излучение

Расчет

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
427.05	427.25	427.75	428.7	430.27	432.58	435.73	439.78	444.75	450.68	457.54	465.34	474.04	483.6	493.97
427.14	427.65	428.74	430.62	433.42	437.2	442.02	447.87	454.71	462.52	471.28	480.93	491.44	502.72	514.7
427.8	430.07	434.13	440.05	447.73	456.98	467.58	479.33	492.04	505.63	520.03	535.16	550.85	566.96	583.35
431.67	441.54	455.75	473.18	492.79	513.73	535.55	557.81	580.18	603.08	626.4	649.9	673.04	695.61	717.56
454.21	492.52	534.18	576.04	616.29	654.26	690.77	725.32	757.83	792.13	826.05	858.66	887.79	914.55	939.54
585.57	696.73	779.28	846.33	900.8	946.68	992.03	1031.05	1065.48	1118.37	1161.37	1197.88	1219.08	1240.5	1261.52

Рис. 2. Страница моделирования нагрева заготовки

Результатом проделанной работы является программное средство, которое позволяет выполнять следующие основные функции:

- расчет распределения температур по сечению металлической заготовки при известных параметрах внешнего теплообмена;
- идентификацию параметров внешнего теплообмена по результатам измерений температуры поверхности металлической заготовки в отдельных точках при различной структуре граничных условий теплообмена в печи – конвекции и излучении.

## Список использованных источников

1. Арутюнов В.А. Математическое моделирование тепловой работы промышленных печей / В.А. Арутюнов, В.В. Бухмиров, С.А. Крупенников. – М.: Металлургия, 1990. – 239 с.
2. Спирин Н.А. Введение в системный анализ теплофизических процессов металлургии: Учебное пособие для вузов / Н.А. Спирин, В.С. Швыдкий, В.И. Лобанов, В.В. Лавров. – Екатеринбург: УГТУ, 1999. – 205 с.
3. Денисов М.А. Экспериментально-расчетный метод определения рациональных режимов нагрева металла в действующих печах // Тезисы докладов всесоюзной научно-технической конференции, посвященной 60-летию ВНИИМТ. – Свердловск, 1990.
4. Соколов А.К. Алгоритмы и программы моделирования и оптимизации тепловой работы промышленных печей. – Иваново: ИЭИ, 1975. – 95 с.
5. Спирин Н.А. Информационные системы в металлургии: учебник для вузов / Н.А. Спирин, Ю.В. Ипатов, В.И. Лобанов [и др.]. – Екатеринбург: УГТУ–УПИ, 2001. – 617 с.
6. Оптимизация и идентификация технологических процессов в металлургии: учеб. пособие / Н.А. Спирин, В.В. Лавров, С.И. Паршаков, С.Г. Денисенко; под ред. Спирин Н.А. – Екатеринбург: УГТУ–УПИ, 2006. – 311 с.

УДК 621.771.25

**М. О. Борисова, С. П. Куделин**

ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет

имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург, Россия

## СИСТЕМА ГРАФИЧЕСКОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ КАЛИБРОВКИ ВАЛКОВ СОРТОПРОКАТНОГО ПРОИЗВОДСТВА

### Аннотация

*В данной статье рассматривается информационная система графического проектирования калибровки валков сортопрокатного производства, в которую входит разработанное авторами статьи приложение для обработки калибровки и графического проектирования в различных масштабах. Приложение предоставляет возможность вводить параметры формоизменения калибровки валков, работать с данными по технической характеристике стана, используемых при прокатке. Кроме того, реализовано графическое проектирование в различных масштабах*

*Разработанное программное средство позволяет автоматизировать графическое проектирование калибровки валков, что понижает временные затраты калибровщика на графическое проектирование и понижает вероятность ошибки при проектировании.*

**Ключевые слова:** информационная система, графическое проектирование, калибровка валков, с#.